

飞机结构电偶腐蚀仿真研究进展及应用方法

陈跃良¹, 黄海亮^{1,2}, 张勇¹, 樊伟杰¹, 卞贵学¹, 王安东¹

(1. 海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041; 2. 91206 部队, 山东 青岛 266109)

摘要: 首先概述了电偶腐蚀仿真技术的发展史, 然后分别对大气和浸泡两种典型环境下的电偶腐蚀模型进行了系统性阐述, 从电解质域内控制方程和电极表面控制方程两方面对飞机电偶腐蚀仿真原理进行了归纳总结。最后基于目前电偶腐蚀仿真技术在飞机结构领域中的应用示例分析, 对后期如何将数据和经验集成到飞机结构腐蚀仿真上进行了展望。

关键词: 电偶腐蚀; 仿真建模; 仿真原理; 飞机

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.05.007

中图分类号: TG172.2; V252

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)05-0047-05

Development and Application of Galvanic Corrosion Simulation for Aircraft Structure

CHEN Yue-liang¹, HUANG Hai-liang^{1,2}, ZHANG Yong¹, FAN Wei-jie¹, BIAN Gui-xue¹, WANG An-dong¹

(1. Qingdao Campus of Naval Aviation University, Qingdao 266041, China; 2. Unit 91206, Qingdao 266109, China)

ABSTRACT: Firstly, the development history of galvanic corrosion simulation technology was summarized, and then the galvanic corrosion models in two typical environments, include atmospheric and immersed, were described specially. The galvanic corrosion simulation principle of aircraft was concluded from the governing equations in the electrolyte domain and the electrode surface. Finally, based on the analysis of current application examples of galvanic corrosion simulation technology in the field of aircraft structure, the outlook of how to integrate data and experience into the simulation of aircraft structure corrosion was prospected.

KEY WORDS: galvanic corrosion; simulation modeling; simulation principle; aircraft

无论是军用飞机还是民用飞机, 环境对机体结构的损伤问题不容忽视, 它是飞机结构完整性与耐久性的重要研究内容。目前针对军机的环境适应性考核主要采用实验室内加速试验和外场暴露两种方法, 评估效率低、成本高昂, 且当局部结构设计发生改变后, 环境考核试验也需要重新进行。

近年来, 得益于电化学理论的不完善和计算机

技术的发展, 人们对于结构环境损伤的认知正由宏观表象向微观机理转变, 腐蚀模拟仿真技术逐渐成为研究热点。该技术以电化学原理为基础, 基于金属材料在不同服役环境下的极化曲线为输入条件, 运用有限元或边界元方法预测机体结构易发生腐蚀的部位, 提高防腐维护工作效率。还可直接指导新研飞机的腐蚀防护设计工作, 达到缩短研制周期、降低费用的目

收稿日期: 2020-03-02; 修订日期: 2019-04-03

Received: 2020-03-02; Revised: 2019-04-03

基金项目: 山东省高等学校“青创科技计划”资助项目 (2020KJA014)

Fund: “Green Innovation Science and Technology Plan” of Colleges and Universities in Shandong Province (2020KJA014)

作者简介: 陈跃良 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为飞机结构强度、腐蚀与防护等。

Biography: CHEN Yue-liang (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: aircraft structural strength, corrosion and protection.

的,提升飞机防腐设计和耐蚀性评价能力。

1 电偶腐蚀仿真模型研究现状

20世纪70年代,最早由 Richard Alkire^[1]提出的一种数学方法预测电沉积过程,是通过计算模拟电解槽内的电流场分布及阴极的二维形貌变化。由于电沉积与电化学腐蚀在本质上的电化学原理相同,随后研究学者将数值计算方法引入电化学腐蚀过程的仿真模拟。近年来随着计算机技术的不断发展和电化学理论的不完善,基于计算机平台的电偶腐蚀仿真模型建立及计算逐渐成为新兴的研究热点。依据环境的不同,腐蚀仿真模型可分为大气环境仿真模型和浸泡环境仿真模型。

1.1 大气环境下仿真模型

大气环境下金属腐蚀的本质是在液膜下发生的电化学腐蚀,与浸泡环境下的电极反应传质过程截然不同,对金属的腐蚀行为产生较大影响。大气电偶腐蚀模型的关键在于液膜几何形态的设定,目前这类模型国内外不少学者也展开了相应的研究。Jong-Min Lee^[2]对薄液膜下锌/铁界面的电偶腐蚀进行了数值分析,通过计算缺陷中心和缺陷边缘的后续电位差,提出了一种在需要详细了解铁/锌动力学情况下整体预测缺陷保护的方法。Nobuhiro Okada^[3]在此基础上,将氧在电解液膜中的溶解速率和扩散速率考虑进去,建立了电偶腐蚀的数值分析模型,此外还考虑了氧的盐析效应、电导率的热依赖性和氧原溶解度。Young P S^[4]采用暴露试验、实验室测量和软件建模三种试验方法相结合的方式模拟了大气电偶腐蚀,最终确定了2024-T3紧固件周围的损伤演化阶段,进而加深了对腐蚀模式和损伤演化的理解,以帮助减轻铝紧固件的大气电偶腐蚀风险。Jeniček V^[5]采用电解液薄膜条件下电偶腐蚀的数学模型对大气腐蚀进行了评价,采用失重实验测定的方法对模型的正确性和准确性进行了验证。结果显示,模型计算结果与实验结果误差为20%左右。Zhang Y^[6]用边界元法计算了薄层电解液中搭接接头(裸接头和涂层损伤)的电位分布和电流密度,发现仿真结果与实际结果的一致性较好。Chen Y^[7]等针对飞机结构大气腐蚀提出了一种有限元模型,并对模型的可靠性进行了试验验证。随后针对薄液膜下多电极耦合的电偶腐蚀,建立了基于薄壳电流分布的多电极耦合仿真模型^[8],并通过与试验结果对比,进一步提高了仿真模型对于预测多电极偶接的腐蚀分布的准确性。国内孙强^[9]、张泰峰^[10]、何祯^[11]等也开展了大量关于大气电偶腐蚀建模的研究。

1.2 浸泡环境下仿真模型

浸泡状态下电偶腐蚀建模由于基础数据易获取,

且试验结果可验证性强,因而得到了广泛研究。Deshpande K B^[12-13]构建了一种预测电偶腐蚀速率的数值模型,该模型可以对腐蚀边界进行动态跟踪。同时为了验证模型的可靠性,Deshpande K B采用扫描振荡电极技术(SVET)对模拟结果进行了试验验证。F. Thébault^[14]建立了考虑氧在溶液中的质量运输的双金属腐蚀电解液电位分布的有限元模型,并与试验结果进行了比对,发现仿真结果与试验的一致性较好。Palani S^[15]对碳纤维增强塑料与AA2024铝合金在体电解质和稀电解质条件下的电偶腐蚀分别进行了实验和数值模拟。Cross S R^[16]建立了一个与时间相关的有限元模型来模拟锌和铝涂层在电解液中与钢基体电耦合的腐蚀,将每种涂层的电偶腐蚀模拟与开路电位的实验测量以及通过表面轮廓术测量的涂层几何形状变化进行了比较。结果显示,两种涂层的模型预测与腐蚀试验之间具有很好的一致性。Radouani R^[17]利用Comsol多物理软件对接头构件的腐蚀参数进行了数值模拟,分析了螺栓与搭接板接触区的电偶腐蚀行为。Chen Y^[18]等对于浸泡状态下的电偶腐蚀进行了数值模拟和试验比对,发现模拟结果与试验结果的一致性较好。近年来国内对于该类模型报道也相对较多^[19-23],涉及各种材料体系及汽车、航空等相关领域。

2 电偶腐蚀仿真原理研究现状

2.1 电解质域内控制方程

目前针对电解质域内电位和粒子浓度的求解基本上都是基于物质守恒的Nernst-Planck方程(式(1))进行计算。物质守恒是指在理想状态下,均相反应的总和为电解质域内的离子扩散、对流、电迁移所产生的反应。

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\nabla \cdot (-D_i \nabla c_i + c_i \mathbf{u} - z_i m_i F c_i \nabla \phi) + R_i \quad (1)$$

式中: F 为法拉第常数; c_i 为不同粒子浓度; $\mathbf{u}$ 为溶液流速矢量; D_i 为扩散系数; z_i 为粒子所带电荷数; m_i 为电迁移系数; R_i 为溶液中*i*粒子由于均相反应造成的净通量。

通过式(1)可以看出,在假设电解质域内共有*n*种粒子的情况下,就可以写出*n*个类似式(1)的偏微分方程,构成方程组。在忽略溶液流动的前提下,要确定该偏微分方程组具有唯一解,并求得电场和浓度场分布,则必须添加另一个限制条件——电中性假设,即电解质域内任意局部净电荷为0,见式(2)。

$$\sum_{i=1}^n z_i c_i = 0 \quad (2)$$

为了增加模型的可操作性,在实际研究中,大多研究者将式(1)进行了简化,即假设模型周边电解质溶液为静态稀溶液,且不存在浓度梯度,无对流效

应。电解质溶液中,带电粒子只通过电迁移形成电流,式(1)就可简化为:

$$\nabla^2 \varphi_1 = \Delta \varphi_1 = 0$$

(3)

即电解质电位 φ_1 的 Laplace 方程,将其进行求解,就可得到腐蚀电场中的电势分布规律。

2.2 电极表面控制方程

腐蚀仿真模型中,电极表面控制方程中的边界条件通过分析拟合电极表面腐蚀动力学极化曲线的方式获得。通过拟合得到的自腐蚀电位、自腐蚀电流密度等腐蚀动力学拟合参数与试验值误差较大,尤其针对部分具有钝化机制的合金适用性差。文献[7,18]引入了表征极化曲线的插值函数(式(4)),以函数形式建立电极电位与电流密度之间的关系,得到电动力学参数,再应用到相应的动力学模型中。这种方法能够更为全面、直接地描述电极表面进行的电动力学过程。

$$i_{\text{anode/cathode}} = f(\Delta E) = f(E - E_{\text{corr}})$$

(4)

3 飞机结构电偶腐蚀仿真应用

最早开展电偶腐蚀仿真技术研究的是欧美部分发达国家。美国作为将腐蚀预测技术最早应用到

工程实际的代表国家之一,可查的公开案例是其国防部 SBIR 项目组对 F18 战机机翼支托架和轮毂的腐蚀仿真。经比较发现,仿真计算得到的电偶腐蚀情况与实际服役后出现的腐蚀状态较为一致。2006 年,在欧盟第六框架计划的支持下,欧洲宇航防务集团创新中心、空客、瑞士联邦材料科学和技术研究所等欧洲十家不同机构以 SICOM (Simulation based Corrosion Management) 项目为框架进行了大范围合作。2013 年,DeRose J A^[24]基于该项目成果,出版了题为《Aluminium alloy corrosion of aircraft structures: modelling and simulation (飞机结构铝合金腐蚀建模与仿真)》的专著^[24],系统介绍了腐蚀仿真在飞机结构铝合金腐蚀的建模方式与应用,这也标志着腐蚀仿真在欧洲航空领域已开始得到相关应用^[24]。

近年来,我国研究学者也开展了很多仿真应用研究^[24]。为了提高模型的可靠性,并尽可能减少试验验证成本,仿真模型的应用及验证一般坚持几何构造由简单到复杂、偏微分方程组变量数由少到多的方式进行^[24]。基于这一原则,飞机结构电偶腐蚀仿真应用可采用“试片→平板件→结构件”的思路开展研究,具体应用流程如图 1 所示。该流程以试片为起始,通过前处理、偏微分方程求解、后处理三个过程,得到试片搭接件的仿真结果。将其与试验进行对比,若二者存

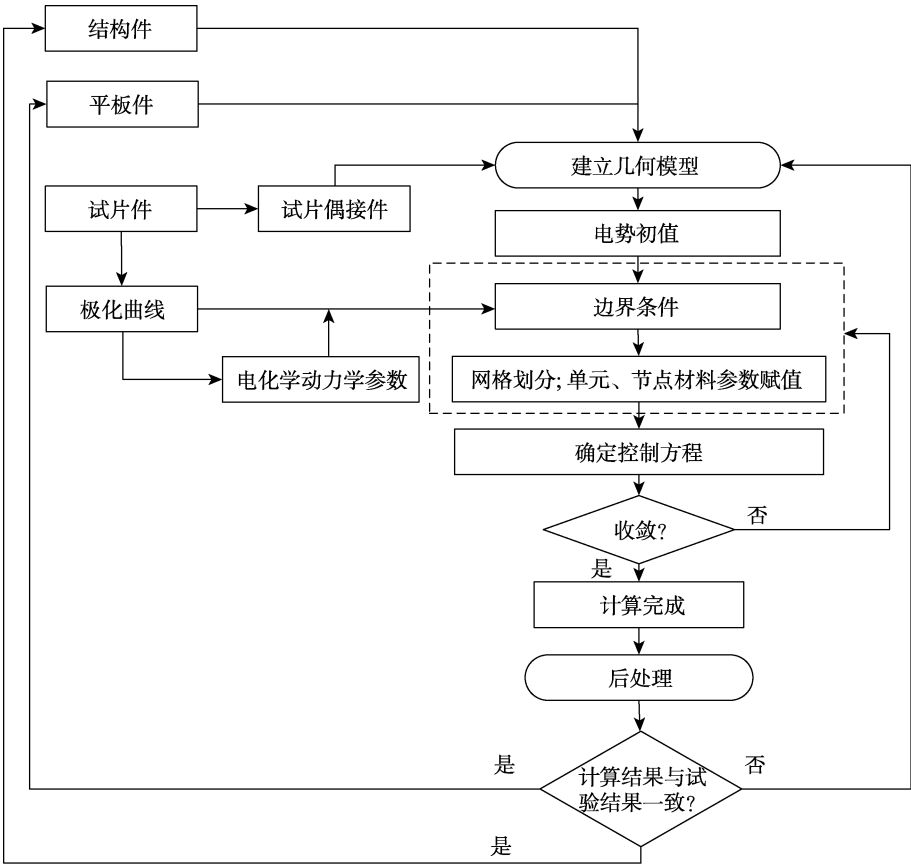


图 1 飞机结构电偶腐蚀仿真应用流程

Fig.1 Application process of aircraft structure galvanic corrosion simulation

在偏差,则返回建模起始,查找问题重新计算。如果仿真与试验结果吻合性较好,则开始平板件的仿真计算。若平板件的仿真与试验结果一致性较好,则可将调试后的模型直接运用到复杂结构件上,完成结构件的腐蚀仿真预测。

4 展望

经历了几十年的努力,我国已经在材料的腐蚀机理方面做了大量的研究工作,积累了许多相关的试验数据和实践经验,但如何将这些数据和经验集成到飞机结构腐蚀仿真上,还需开展部分相关的工作,可从以下几个方面着手。

1) 规划飞机结构腐蚀仿真总体方案,健全管理体制,出台对应的技术规范和标准文件,规范腐蚀仿真基础数据的获取方式,建立规范数据库,并开展长期的数据库补充、修正以及共享工作。

2) 规范环境数据的采集方式,积累各型飞机使用材料在不同服役环境下的自然环境腐蚀数据,为腐蚀仿真结果的有效性和准确性提供对应的验证数据。

3) 发展不同因素对材料耐蚀性影响的试验手段,探究其影响规律,基于此开展多场耦合条件下的腐蚀仿真方法研究。

参考文献:

- [1] RICHARD A, TERRY B. Predicting Electrode Shape Change with Use of Finite Element Methods[J]. Journal of The Electrochemical Society, 1978, 125(12): 1981-1988.
- [2] LEE J M. Numerical Analysis of Galvanic Corrosion of Zn/Fe Interface Beneath a Thin Electrolyte[J]. Electrochimica Acta, 2006, 51(16): 3256-3260.
- [3] NOBUHIRO O. Numerical Analysis of Galvanic Corrosion under a Thin Electrolyte Film[J]. Corrosion Engineering, 2012 61(10): 376-383.
- [4] YOUNG P S. Modeling and Analysis for Atmospheric Galvanic Corrosion of Fasteners in Aluminum[D]. Ohio: University of Akron, 2015.
- [5] JENÍČEK V, DIBLÍKOVÁ L. A Mathematical Model of Galvanic Corrosion under the Conditions of a Thin Electrolyte Film[J]. Acta Polytechnica, 2016, 56(2): 106-111.
- [6] ZHANG Y, CHEN Y L, FAN W J, et al. Study on the Galvanic Corrosion of Aluminum Alloy Single Bolted Lap Joints in Simulated Atmospheres[J]. Materials and Corrosion, 2017, 68(10): 1107-1115.
- [7] CHEN Y, HUANG H, ZHANG Y, et al. A Method of Atmospheric Corrosion Prediction for Aircraft Structure[J]. Materials and Corrosion, 2019, 70(1): 79-90.
- [8] 陈跃良, 黄海亮, 卞贵学, 等. 多电极偶接对金属大气腐蚀影响的试验与仿真[J]. 航空学报, 2017, 39(6): 421751.
- [9] 孙强. 模拟海洋环境下 7B04 铝合金电偶腐蚀预测及验证[J]. 失效分析与预防, 2018, 13(4): 203-208.
- [10] 张泰峰, 张勇, 黄海亮, 等. 某型飞机结构件局部腐蚀仿真与试验验证[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(7): 523-529.
- [11] 何祯, 张小明, 孟嘉琳, 等. 异种金属连接结构的电偶腐蚀周浸试验及有限元仿真[J]. 材料保护, 2019, 52(6): 64-70.
- [12] DESHPANDE K B. Validated Numerical Modelling of Galvanic Corrosion for Couples: Magnesium Alloy (AE44)-mild Steel and AE44-aluminium Alloy (AA6063) in Brine Solution[J]. Corrosion Science, 2010, 52(10): 3514-3522.
- [13] DESHPANDE K B. Effect of Aluminium Spacer on Galvanic Corrosion between Magnesium and Mild Steel Using Numerical Model and SVET Experiments[J]. Corrosion Science, 2012, 62: 184-191.
- [14] THÉBAULT F, VUILLEMIN B, OLTRA R, et al. Modeling Bimetallic Corrosion under Thin Electrolyte Films[J]. Corrosion Science, 2011, 53(1): 201-207.
- [15] PALANI S. Modelling of Galvanic Corrosion on Hybrid Structures in Aircraft[D]. Philadelphia: Uitgeverij University, 2013.
- [16] CROSS S R, GOLLAPUDI S, SCHUH C A. Validated Numerical Modeling of Galvanic Corrosion of Zinc and Aluminum Coatings[J]. Corrosion Science, 2014, 88: 226-233.
- [17] RADOUANI R, ECHCHARQY Y, ESSAHLI M. Numerical Simulation of Galvanic Corrosion between Carbon Steel and Low Alloy Steel in a Bolted Joint[J]. International Journal of Corrosion, 2017, 8(6), 1-10.
- [18] CHEN Y, HUANG H, ZHANG Y, et al. A Finite Element Model (FEM) for Predicting the Corrosion of Multi-material Coupling System on Aircrafts[J]. Materials and Corrosion, 2018, 69(11): 1649-1657.
- [19] 孙文. 腐蚀产物沉积对局部腐蚀行为影响的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [20] CHEN Y L, HUANG H L, BIAN G X, et al. Test and Simulation of Effects of Multi-electrode Coupling on Atmospheric Corrosion of Metals[J]. Journal of Aviation, 2017, 39(6): 421751.
- [21] SUN Q. Corrosion Prediction and Verification of 7B04 Aluminum Alloy under Simulated Marine Environment[J]. Failure Analysis and Prevention, 2018, 13(4): 203-208.
- [22] HE Y, ZHANG X M, MENG J L, et al. Galvanic Corrosion Immersion Test and Finite Element Simulation of Heterogeneous Metal Connection Structure[J]. Materials Protection, 2019, 52(6): 64-70.
- [23] SUN W. Numerical Simulation of the Effect of Corrosion Product Deposition on Local Corrosion Behavior[D]. Da-

- lian: Dalian University of Technology, 2013.
- [20] 王振华, 白杨, 马晓, 等. 钛合金和铜合金管路电偶腐蚀数值仿真[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2018, 38(4): 97-102.
WANG Z H, BAI Y, MA X, et al. Numerical Simulation of Galvanic Corrosion of Titanium Alloy and Copper Alloy Pipelines[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2018, 38(4): 97-102.
- [21] 胡志江, 安子军, 朱志华, 等. 镁合金轮毂螺栓连接的电偶腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(3): 184-193.
Hu Z J, An Z J, Zhu Z H, et al. Corrosion Behavior of Magnesium Alloy Wheel Bolt Connections [J]. Corrosion and Protection, 2018, 39(3): 184-193.
- [22] 刘岩, 解辉, 曹青敏, 等. 基于数值仿真技术的钢/钛电偶腐蚀行为研究[C]// 第十届全国腐蚀大会摘要集. 北京: 中国腐蚀与防护学会, 2019.
LIU Y, XIE H, CAO Q, et al. Research on the Corrosion Behavior of Steel Titanium Galvanic Couples Based on Numerical Simulation Technology[C]// Summary of the Tenth National Conference on Corrosion. Beijing: Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019.
- [23] 陈跃良, 王安东, 卞贵学, 等. CF8611/AC531 复合材料性能及与 7B04 铝合金电偶腐蚀的电化学研究[J]. 材料工程, 2019, 47(1): 101-109.
CHEN Y L, WANG A D, TONG G X, et al. Electrochemical Study on the Properties of CF8611/AC531 Composite and Galvanic Corrosion with 7B04 Aluminum Alloy[J]. Materials Engineering, 2019, 47(1): 101-109.
- [24] DEROSE J A. Aluminium Alloy Corrosion of Aircraft Structures: Modelling and Simulation[M]. Ashurst: WIT Press, 2013.
- [25] 崔深山. 面向积木式试验的复合材料典型结构件分析与验证[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
CUI S S. Analysis and Verification of Composite Structural Parts for Building Block Test[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [26] PALANI S, HACK T, DECONINCK J, et al. Validation of Predictive Model for Galvanic Corrosion under Thin Electrolyte Layers: An Application to Aluminium 2024-CFRP Material Combination[J]. Corrosion Science, 2014, 78(1): 89-100.
- [27] CROSS S R, GOLLAPUDI S, SCHUH C A. Validated Numerical Modeling of Galvanic Corrosion of Zinc and Aluminum Coatings[J]. Corrosion Science, 2014, 88: 226-233.
- [28] DANIEL H. Simulation of Corrosion Product Deposit Layer Growth on Bare Magnesium Galvanically Coupled to Aluminum[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2015, 162(1): 1-11.
- [29] HÖCHE D, ISAKOVIC J. Level-set Modeling of Galvanic Corrosion of Magnesium[C]// Mg2012 Conference. Vancouver, BC, Canada, 2012.
- [30] SONG F M. A Mathematical Model Developed to Predict the Chemistry and Corrosion Rate in a Crevice of Variable Gap[J]. Electrochimica Acta, 2011, 56(19): 6789-6803.
- [31] DUDDU R, NITHYANAND K, SIDDIQ M. An Extended Finite Element Method Based Approach for Modeling Crevice and Pitting Corrosion[J]. Journal of Applied Mechanics, 2016, 83(8): 081003